



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

HIRSINOSTURIN SUUNNITTELU YRITYKSEN TARPEISIIN

Leo Norosoja

Opinnäytetyö
Joulukuu 2016
Kone- ja tuotantotekniikka
Kone- ja laiteautomaatio



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Kone- ja laiteautomaatio

NOROSOJA, LEO:

Hirsinosturin suunnittelu yrityksen tarpeisiin

Opinnäytetyö 44 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Joulukuu 2016

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin tulevaisuudessa toteutettava uusi hirsinosturi Tmi P. Norosojan hirsirakennusyritykseen. Nosturia käytetään apuna nostettaessa pelkka- ja pyöröhirsii kehikoiksi. Tavoitteena oli suunnitella parempi ja käytännöllisempi ratkaisu vanhan vaikeakäyttöisen ja epävarman nosturin tilalle. Yritykseltä saatiin toivomuksia siitä, millainen uuden nosturin tulisi olla, ja suunnitelma tehtiin näiden tietojen pohjalta.

Työssä suunniteltiin sähkökäyttöinen nosturi, jota käytettäessä hirsii ei tarvitse käsitellä manuaalisesti. Nosturin rakenteille laskettiin lujuuslaskelmat ja nosturin rakenteen lujuutta testattiin Autodesk Inventor -ohjelman Stress Analysis -toiminnolla. Ohjelman ja laskelmien avulla saatiin tuloksia nosturin kestävydestä, taipumisesta ja turvallisuudesta. Eri yritysten nettisivuilta etsittiin komponentteja ja ratkaisuja nosturin suunnitteluun.

Opinnäytetyön tuloksena työn tilannut yritys sai suunnitelman uudesta nosturista ja tarvittavat tiedot osista ja laitteista, joita nosturin rakentaminen vaatii.

Asiasanat: hirsinosturi, sähkökäyttöinen, suunnitelma

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Mechanical and Production Engineering
Machine Automation

NOROSOJA, LEO:

Development of a Timber Crane for Company Needs

Bachelor's thesis 44 pages, appendices 4 pages
December 2016

The purpose of this bachelor's thesis was to plan a new timber crane that would be implemented at some point for Tmi P. Norosoja log house company. The crane is used as an aid for lifting timber up to the timber frame. The goal was to design a better and more practical solution and to replace the old unreliable crane that was also difficult to use. Wishes were received from the company on what the new crane should be like and the layout was made based on this information.

In this study, an electric crane was designed to make it possible that the timber would not have to be handled manually. The strength of materials were calculated for the structure of the crane. The structure was also tested with the Autodesk Inventors Stress Analysis tool. Through the calculations and a stress analysis, information about the crane's durability, flexibility and safety issues were obtained. Components and solutions for the design of the crane were searched from websites of different companies.

In conclusion, the commissioning company received a plan for the new timber crane and got the needed information about the parts and equipment that was needed for the construction of the crane.

Key words: timber crane, electric crane, design

SISÄLLYS

| | | |
|---|--|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 7 |
| 2 | YRITYSESITTELY | 8 |
| 3 | NOSTURIN OSIEN TEORIA | 10 |
| | 3.1 Sähkötalja..... | 10 |
| | 3.1.1 Sähköketjutalja..... | 11 |
| | 3.1.2 Sähkövaijeritalja..... | 12 |
| | 3.2 Liukulaakeri | 12 |
| | 3.3 Hammaspyörät | 13 |
| | 3.3.1 Lieriöhammaspyöräpari | 14 |
| | 3.3.2 Kartiohammaspyöräpari..... | 14 |
| | 3.3.3 Kierukka- ja ruuvipyöräparit..... | 15 |
| | 3.3.4 Nosturiin valittu hammaspyöräpari..... | 15 |
| | 3.4 Taajuusmuuttaja..... | 17 |
| 4 | NOSTUREIDEN RAKENTEIDEN VERTAILU | 18 |
| | 4.1 Käytössä olevan nosturin esittely | 18 |
| | 4.2 Suunniteltavan nosturin ominaisuudet ja vaatimukset..... | 20 |
| 5 | LUJUUSLASKUT | 22 |
| | 5.1 Pistekuormitus | 22 |
| | 5.2 Tasainenkuormitus..... | 23 |
| | 5.3 Myötöraja ja sallittu jännitys | 23 |
| | 5.4 Taivutusvastus | 23 |
| | 5.5 Autodesk Inventor ja Stress Analysis | 26 |
| 6 | TARVITTAVAT KOMPONENTIT | 30 |
| | 6.1 Teräsosat | 30 |
| | 6.2 Moottori ja sähköketjutalja | 30 |
| | 6.3 Hammaspyöräpari | 32 |
| | 6.4 Taajuusmuuttaja..... | 32 |
| | 6.5 Nosturin kokoaminen..... | 33 |
| | 6.6 Kustannusarvio | 34 |
| 7 | KONETURVALLISUUS..... | 36 |
| | 7.1 Koneasetus | 36 |
| | 7.2 Käytössä huomioitavia ohjeita..... | 36 |
| 8 | POHDINTA..... | 38 |
| | LÄHTEET..... | 39 |
| | LIITTEET | 41 |
| | Liite 1. Suunnitteluprosessin kulku..... | 41 |

| | |
|--------------------------------|----|
| Liite 2. IPE-palkki | 42 |
| Liite 3. Pystypalkki..... | 43 |
| Liite 4. Hammaspyöräpari | 44 |

ERITYISSANASTO

| | |
|---------------------|--|
| jakoympyrä | hammaspyöräparissa olevat hammaspyörät muodostavat jakoympyrät, jotka liukuvat toisiaan vasten |
| moduuli | hammaspyörän standardoitu kokomitta |
| myötöraja | raja, jonka jälkeen aineessa tapahtuu pysyviä muodonmuutoksia |
| taajuusmuuttaja | laite, jolla voidaan säätää portaattomasti moottorin pyörimisnopeutta |
| taivutusvastus | kuvaa kappaleen kykyä vastustaa taipumaa |
| von mises -jännitys | suurin kappaleeseen kohdistuva jännitys |

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin uusi hirsinosturi Tmi Pauli Norosojan hirsirakennus yritykseen. Yritys on toiminut 5 vuotta, ja käytössä oleva yrittäjän itsensä tekemä nosturi on ollut käytössä 2 vuotta. Yrityksessä tällä hetkellä käytössä oleva nosturi ei enää vastaa yrityksen tarpeita. Yrittäjältä saatiin toiveita ja tietoja siitä, millainen uuden nosturin tulisi olla ja mitä vaatimuksia sen tulisi täyttää. Uutta nosturia lähdettiin suunnittelemaan näiden toivomusten pohjalta. Hirsinosturin suunnitteluprosessi on esitetty kokonaisuudessaan tiivistetysti liitteessä 1.

Opinnäytetyössä esitellään aluksi kyseinen yritys, johon uutta nosturia suunniteltiin. Tämän jälkeen esitellään teoriaa nosturiin tulevista komponenteista. Seuraavaksi kerrotaan vanhasta nosturista, sen puutteista ja uusista tarvittavista ominaisuuksista. Luvussa 5 aletaan suunnitella uutta nosturia. Uudelle nosturille laskettiin lujuuslaskut, että sen kestävyys taattiin. Laskujen lisäksi uutta nosturia testattiin piirtämällä siitä 3D-malli ja testamalla 3D-mallia Autodesk Inventorin Stress Analysis -työkalulla. Testauksen avulla nähtiin, minkä suuruisia jännityksiä ja siirtymiä nosturiin kohdistuu, sekä saatiin tietoa nosturin turvallisuudesta.

Uudelle nosturille tehtiin hinta-arvio ja selvitys tarvittavista komponenteista, joiden avulla uusi nosturi voidaan rakentaa. Nosturi voidaan valmistaa suunnitelman mukaan, mutta siihen voi tehdä haluttaessa tarpeen mukaan muutoksia ja tuotekehittelyä.

2 YRITYSESITTELY

Tmi Pauli Norosojan yritys sijaitsee Kangasalan Majaalahdessa. Yhden hengen yrityksessä valmistetaan käsin veistettyjä pelkka- ja pyöröhirsirakennuksia yrittäjän omista puista. Myös asiakkaiden omista puista veistäminen on mahdollista. Materiaaleina käytetään etupäässä mäntyä, kuusta ja haapaa. Tuotannossa on pääosin aittoja, laavuja, grillikotia, saunoja ja puuliiterteitä, mutta mahdollisuuksia on rajattomasti asiakkaiden toiveiden mukaisesti. Kuvassa 1 on esimerkki valmiista pelkkahirsimökistä. (TaideTalli 2016.)



KUVA 1. Pelkkahirsimökki lohenpyrstönurkalla (Kuvaaja: Leo Norosoja 2014)

Yrittäjän kiinnostus hirsirakentamiseen alkoi vuonna 2011 käydystä hirsikurssista Kurun metsäoppilaitoksessa. Rakennukset tehdään yksilöllisesti asiakkaiden toiveiden mukaan pelkka- tai pyöröhirrestä ja halutulla nurkkatyypillä. Erilaisia nurkkatyyppejä ovat esimerkiksi lohenpyrstönurkka, koirankaulanurkka ja pitkänurkka. Työkaluna veistämisessä käytetään suurimmaksi osaksi vain moottorisahaa. Kuvassa 2 on esimerkki valmiista pyöröhirsikehikosta. (Norosoja 2016.)



KUVA 2. Pyöröhirsikehikko koirankaulanurkalla (Kuvaaja: Leo Norosoja 2016)

Yritykseltä saa tilattua hirsikehikkoon erikseen myös perustukset, pystytyksen, vesikaton, lattiat, ovet ja ikkunat. Myös konsultointi, korjausrakentaminen ja tehdasrakenteisten kehikoiden kokoaminen kuuluvat yrityksen palveluihin. Yrityksessä valmistetaan myös pienempiä tuotteita. Erikoisempia tilattuja tuotteita ovat olleet esimerkiksi Kangasala-taloon suunniteltu 2-osainen tarjoilupöytä pelkkahirrestä (kuva 3). (TaideTalli 2016.)



KUVA 3. Tarjoilupöytä Kangasala-talossa (TaideTalli 2016)

Toinen erikoisempi tilattu tuote on Tampereen ammattikorkeakoulun tiloihin toteutettu puhujapöytä ja tarjottimet (kuva 4). Tmi Pauli Norosojan yrityksen nettisivut löytyvät osoitteesta www.taidetalli.fi/hirsi. (Norosoja 2016.)



KUVA 4. Puhujapöytä Tampereen ammattikorkeakoululla (Kuvaaja: Leo Norosoja 2016)

3 NOSTURIN OSIEN TEORIA

Tässä luvussa kerrotaan teoriaa uuteen nosturiin tulevista osista ja komponenteista. Ensin kerrotaan teoriaa sähkötaljasta sekä erikseen sähköketju- ja sähkövaijeritaljasta. Näiden lisäksi kerrotaan liukulaakerista, taajuusmuuttajasta ja erilaisista hammaspyöräpareista.

3.1 Sähkötalja

Sähkötalja on nostamiseen käytettävä laite, jota voidaan käyttää monilla teollisuuden aloilla. Se sopii monenlaiseen nostamistarpeeseen. Taljaa käytetään apuna silloin, kun nostettava kuorma on liian raskas ihmiselle nostettavaksi tai kuorma täytyy nostaa korkealle. Sähkötalja voi olla ketju- tai vaijerikäyttöinen. Taljoissa käytetään samanlaisia mootoreita, jarruja ja ohjaimia. Suurin ero vaijeri- ja ketjutaljan välillä on nostomekanismin toteutus. (North American Industries 2002-2008.)

Sähkötaljoja on eriluokkaisia. Luokka valitaan sen mukaan, kuinka kovassa käytössä taljaa pidetään. Taulukossa 1 on esitetty luokat ja niiden perusteet.

TAULUKKO 1. Taljojen luokat (Ace Industries, Inc 2016)

| The following chart is provided to give the reader an idea of the relative significance of the duty cycle ratings for the various electric hoists depicted in this web. The duty cycle determination for a particular application involves obtaining a significant amount of additional information and expertly applying it to the intended use. Please consult our application experts before making any duty cycle decisions. This table is given for reference only. Do not rely upon it for your application. | | | | | |
|--|---|--|--------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Hoist Duty Class | Typical Areas of Application | Operational Time Ratings at 65% Mean Load Factor | | | |
| | | Uniformly Distributed Work Periods | | Infrequent Work Periods | |
| | | Max On Time Min/Hour | Max No. Starts/hr. | Max On Time from Cold Start | Max Number Starts |
| H1 | Powerhouse and Utilities, infrequent handling. Hoists used primarily to install and service heavy equipment, loads frequently approach capacity and hoist idle for long periods between use. | 7.5 minutes (12.5%) | 75 | 15 minutes | 100 |
| H2 | Light machine shop fabricating, service and maintenance; loads and utilization randomly distributed; rated loads infrequently handled. Total running time not over 12.5% of the work period. | 7.5 minutes (12.5%) | 75 | 15 minutes | 100 |
| H3 | General machine shop fabricating, assembly, storage, and warehousing; loads and utilization randomly distributed. Total running time not over 25% of work period. | 15 minutes (25%) | 150 | 30 minutes | 200 |
| H4 | High volume handling of heavy loads, frequently near rated load in steel warehousing, machine and fabricating shops, mills, and foundries, with total running time not over 50% of the work period. | 30 minutes (50%) | 300 | 30 minutes | 300 |
| | Manual or automatic cycling operations of lighter loads with rated loads infrequently handled such as in heat treating or plating operations, with total running time frequently 50% of the work period. | | | | |
| H5 | Bulk handling of material in combination with buckets, magnets, or other heavy attachments. Equipment often cab operated. Duty cycles approaching continuous operation are frequently necessary. User must specify exact details of operation, including weight of attachments. | 60 minutes (100%) | 600 | Not Applicable [Note (1)] | Not Applicable [Note (2)] |

NOTE: (1) Not applicable since there are no infrequent work periods in Class H5 service.

Luokka-asteeseen vaikuttaa se, kuinka monta tuntia sähkötaljaa käytetään päivässä ja kuinka taajaan sitä käynnistetään. Sähköketjutalja voidaan luokitella H-3een ja H-4een asti. Sähkövaijeritalja voidaan näiden lisäksi luokitella H-5:ksi. Nämä taljat kestävät siis melko kovaa käyttöä. (North American Industries 2002-2008.)

Nosturiin valittiin sähköketjutaljaksi luokaltaan H4 oleva talja. Tätä taljaa voidaan käyttää taulukon 1 mukaan 30 minuuttia tunnissa ja se voidaan käynnistää 300 kertaa tunnissa. Pienempiluokkainenkin talja riittäisi nosturiin tällä hetkellä, mutta valitaan luokan H4 talja tulevaisuutta ajatellen.

3.1.1 Sähköketjutalja

Sähköketjutalja nostaa kuorman vetämällä ketjun ketjupyörien läpi. Ketju menee erilliseen ketjunsäilytysastiaan, joka on taljassa kiinni. Ketjutaljaa käytetään yleensä, kun nostotarve on alle 7,5 tonnia. Ketjutaljat ovat halvempia ja vaativat vähemmän kunnossapitoa ja huoltoa kuin vaijeritaljat. Ketjutaljalla pystytään toteuttamaan tarkka pystysuora nosto. Tästä syystä se sopii kohteisiin, joissa vaaditaan erityistä tarkkuutta. Kuvassa 5 on esitetty sähkösiirtovaunulla varustettu sähköketjutalja. (North American Industries 2002-2008.)



KUVA 5. Sähköketjutalja varustettuna sähkösiirtovaunulla (Loadmate 2011)

3.1.2 Sähkövaijeritalja

Vaijeritalja nostaa kietomalla vaijeria erillisen rummun ympärille. Vaijerikäyttöiset taljat ovat yleisempiä, kun nostetaan yli 10 tonnin kuormia. Niillä on mahdollisuus nopeaan nostoon. Vaijeritalja siirtää nostettavaa kuormaa hieman sivuttain, koska vaijeri kietoutuu rummun ympärille nostettaessa. Tästä syystä se ei ole yhtä hyvä vaihtoehto todella tarkkoihin nostoihin kuin sähköketjutalja. Sähkövaijeritaljat ovat kalliimpia kuin sähköketjutaljat, koska mekanismi, jossa vaijeri kietoutuu rummun ympärille, on kallis valmistaa. Kuvassa 6 on esitetty sähkövaijeritalja. (North American Industries 2002–2008.)



KUVA 6. Sähkövaijeritalja varustettuna sähkösiirtovaunulla (Loadmate 2011)

3.2 Liukulaakeri

Laakerin tehtävä on sallia akselin pyörivä liike, tukea ja ohjata akselia sekä kantaa koneen tai laitteen toiminnasta aiheutuva kuormitus. Liukulaakerissa laakeriaineenpinta ja akseli liukuvat toisiaan vasten. Vierintälaakerissa kuula tai rulla on laakerirenkaiden välissä. Liukulaakeri voi olla rakenteeltaan säteis- tai aksiaalilaakeri riippuen sen kuormitussuunnasta. Jos liukulaakeria käytetään tukemaan myös aksiaalista kuormaa, laakerissa on samaan rakenteeseen koneistettu laippa. (Ansaharju 2009, 135–136.)

Materiaalilla on tärkeä merkitys liukulaakerin toiminnan kannalta. Akselimateriaalina käytetään yleensä terästä tai valurautaa. Liukulaakerin tulee olla valmistettu pehmeämmästä aineesta kuin akselin, jolloin kulumisen kohdistuu laakeriin. Laakeriaineella tulee olla hyvät liukuominaisuudet, mutta sen on kuitenkin kestävä kulumista ja kuormitusta. (Ansaharju 2009, 137–138.)

Laakerimateriaalin tulee olla hyvin lämpöä johtavaa, mutta huonosti lämpölaajenevaa. Yleisemmin käytettyjä liukulaakeriaineita ovat lyijy- ja tinapronssi, valkometalli, kupari- ja alumiiniseokset. Lisäksi voidaan käyttää valurautaa, kumia, nailonia, teflonia, grafiitteja, hopeaa ja muovia. (Ansaharju 2009, 137–138.)

Voiteluaineena voidaan käyttää rasvaa tai öljyä. Rasvaa käytetään pyörimisnopeuden ja kuormituksen ollessa vähäistä. Rasvavoitelu sopii paremmin suuriin laakerivälisiin ja suojaamattomaan laakerointiin. Rasva muodostaa puresutessaan kerroksen, joka suojaa laakeria pölyltä, liialta ja nesteiltä. Rasvaa voidaan laittaa laakeriin rasvapuristimella rasvanipan läpi. (Ansaharju 2009, 141.)

Öllyvoitelua käytetään puolestaan suurilla kuormituksilla ja nopeuksilla. Öllyvoitelu voidaan suorittaa nipan läpi samaan tapaan kuin rasvavoitelu. Muita vaihtoehtoja ovat kiertovoitelu ja voitelurengasmenetelmä. Kiertovoitelussa öljypumppu kierrättää öljyä laakerissa putkistoa pitkin ja ylimääräinen öljy valuu säiliöön. Voitelurengasmenetelmässä rengas nostaa öljyn akselin ja laakerin väliin. Tällöin laakeripesän rakenteessa on oltava erillinen öljysäiliö. (Ansaharju 2009, 141.)

3.3 Hammaspyörät

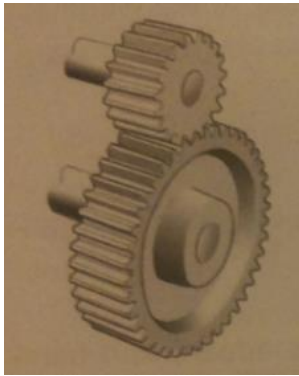
Hammaspyöriä käytetään mekaanisessa voimansiirrossa. Niiden avulla voidaan siirtää voimaa ja tehoa akselilta toiselle, sekä muuttaa tarvittaessa pyörimisnopeutta akselien välillä. Pyörimisnopeus muuttuu, kun hammaspyöräparissa käytetään erikokoisia hammaspyöriä. Hammaspyöräparissa pienemmän pyörän pyörimisnopeus on suurempi kuin suuremman pyörän. Käytettävien pyörien hammastusten tulee olla yhteensopivat toisiinsa nähden. Hammaspyöräparissa on käytävä ja käytettävä pyörä. Käytävä pyörä on kiinni esimerkiksi moottorin akselissa ja käytettävä pyörä on kiinni koneen akselissa, jota halutaan pyörittää. Käytävän pyörän pyöriessä se työntää käytettävää pyörää edellään saaden aikaan tehonsiirtoa akselilta toiselle. (Ansaharju 2009, 178–179.)

Yleisin hammaspyörien valmistustapa on jyrsimä. Jyrsimällä saadaan aikaan kova ja luja pinta, joka kestää hyvin kulutusta. Hammaspyöriä valmistetaan käyttökohteesta riippuen monista materiaaleista. Materiaaleina käytetään erilaisia teräksiä, valurautaa, muovia ja

pronssia. Tavallisimpia hammaspyöräparinrakenteita ovat lieriöhammaspyöräpari, kartiohammaspyöräpari sekä kierukka- ja ruuvipyöräparit. (Ansaharju 2009, 178–179.)

3.3.1 Lieriöhammaspyöräpari

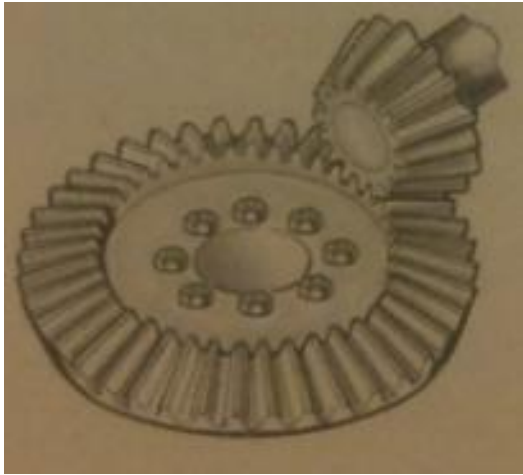
Lieriöhammaspyöräpareja käytetään kohteissa, joissa akselit ovat yhdensuuntaiset. Lieriöhammaspyöräpari voi olla suora-, vino- tai nuolihampainen. Suorahampainen on näistä halvin vaihtoehto ja helpoin valmistaa. Ne ovat kuitenkin meluisampia eivätkä käy yhtä tasaisesti kuin vino- ja nuolihampaiset hammaspyöräparit. Suora- ja nuolihampaiset hammaspyörät eivät aiheuta akselin suuntaisia voimia kuten vinohampaiset ja säästävät näin laakeria. Lieriöhammaspyöräpari on esitetty kuvassa 7. (Ansaharju 2009, 180.)



KUVA 7. Suorahampainen lieriöhammaspyöräpari (Ansaharju 2009, 179)

3.3.2 Kartiohammaspyöräpari

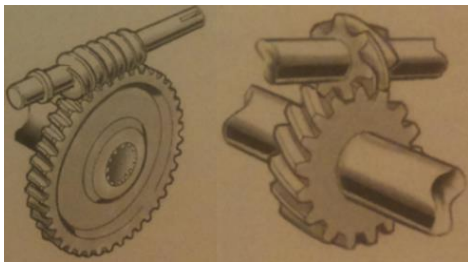
Kartiohammaspyöräparia käytetään kohteissa, joissa akselit risteävät ja ovat esimerkiksi 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Kartiohammaspyöräparissa hammaspyörät ovat kartion muotoiset. Hampaat voivat olla suorat tai vinot kuten lieriöhammaspyöräpareissa. Myös kaareva hampaiden muoto on mahdollinen. Kartiohammaspyöräparissa voidaan käyttää kahta samahammaslukuista hammaspyörää, jos pyörimisnopeus halutaan säilyttää muuttumattomana. Vaadittaessa hiljaista käyntiääntä ja -tarkkuutta käytetään vinoa ja kaarevaa hammastusta. Kartiohammaspyöräparia käytetään tehojen ollessa suuria ja välityssuhteiden pieniä. Kartiohammaspyöräpari on esitetty kuvassa 8. (Ansaharju 2009, 185.)



KUVA 8. Kartiohammaspyöräpari (Ansaharju 2009, 179)

3.3.3 Kierukka- ja ruuvipyöräparit

Kierukka- ja ruuvipyöriä voidaan käyttää kohteissa, joissa akselit risteävät, samaan tapaan kuin kartiohammaspyöräparia. Ruuvipyörää voidaan käyttää lähes minkälaisessa tilanteessa vaan, jossa akselit risteävät toisiinsa nähden. Kierukkavaihteella saadaan aikaan suuri välityssuhde. Kierukka- ja ruuvipyöräpari on esitetty kuvassa 9. (Ansaharju 2009, 187–188.)



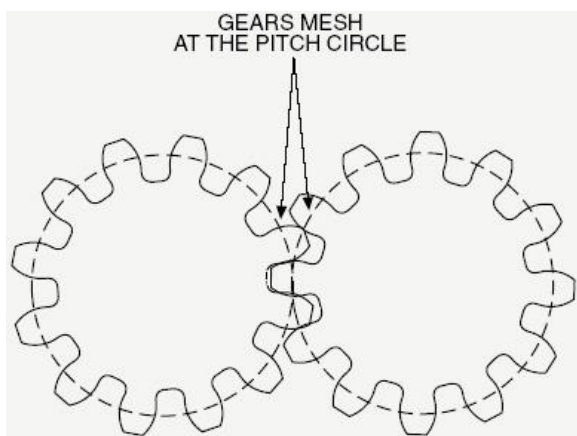
KUVA 9. Kierukka- ja ruuvipyöräpari (Ansaharju 2009, 179)

3.3.4 Nosturiin valittu hammaspyöräpari

Uuteen nosturiin valittiin suorahampainen lieriöhammaspyöräkäyttö, joten tarkastellaan lieriöhammaspyöräparin valinnan teoriaa. Lieriöhammaspyöräparissa olevilla hammaspyörillä pitää olla sama moduuli ja hammasjako. Hammaspyörän moduulit ovat standardeitua ja taulukoituja arvoja, jotka määrittävät hammaspyörän kokomitan. Moduuli lasketaan kaavalla 1. (Ansaharju 2009, 180–181.)

$$m = \frac{d}{z} = \frac{p}{\pi} \quad (1)$$

Kaavassa 1 m tarkoittaa moduulia, d tarkoittaa hammaspyörän jakohalkaisijaa, z tarkoittaa hammaslukua ja p tarkoittaa hammasjakoa. Hammaspyöräparissa olevat hammaspyörät muodostavat kaksi ympyrää, joita kutsutaan jakoympyröiksi (kuva 10). Hammaspyörrien jakoympyrät ovat kosketuksissa toisiinsa ja pyörivät yhdessä. Jakoympyrän halkaisijaa kutsutaan hammaspyörän jakohalkaisijaksi d . Jakohalkaisija saadaan laskettua kaavasta 1, kun hammaspyörän moduuli ja hammasluku tiedetään. (Ansaharju 2009, 180–181.)



KUVA 10. Hammaspyörrien jakoympyrät (Misumi Mech Lab)

Hammaspyörän hammasjako saadaan, kun mitataan hammaspyörän jakoympyrän kaaren pituus hampaan kyljestä seuraavan hampaan vastaavaan kylkeen kahdesta vierekkäisestä hampaasta. Hammasjako lasketaan kaavalla 2.

$$p = \frac{\pi d}{z} = \pi m \quad (2)$$

Hammasjako saadaan, kun hammaspyörän moduuli kerrotaan piillä. (Ansaharju 2009, 180–181.)

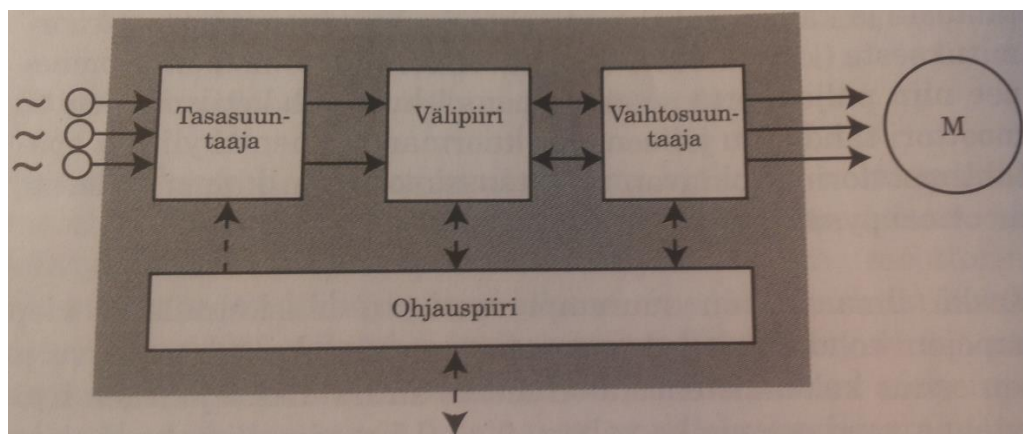
Hammaspyöräparin tärkein tehtävä on moottorilta tulevan pyörimisnopeuden muuttaminen käytettävälle laitteelle sopivaksi. Tällöin puhutaan välityssuhteesta, johon vaikuttaa hammaspyörrien jakohalkaisijat, hammasluku ja pyörimisnopeus. Hammaspyöräparin välityssuhde voidaan laskea kaavalla 3.

$$i = \frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3)$$

Kaavassa ylärivillä ovat käyttävän pyörän jakohalkaisija, hammasluku ja pyörimisnopeus ja alarivillä käytettävän pyörän vastaavat arvot. (Ansaharju 2009, 191.)

3.4 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on laite, jonka avulla voidaan säätää portaattomasti moottorin pyörimisnopeutta syöttöverkon taajuutta muuttamalla. Pyörimisnopeus pienenee taajuuden pientyessä ja vastaavasti kasvaa taajuuden kasvaessa. Taajuusmuuttaja koostuu seuraavista osista: tasasuuntaaja, välipiiri, vaihtosuuntaaja ja ohjauspiiri (kuva 11). (Danfoss Drives A/S 2000, 52.)



Kuva 11. Periaatekuva taajuusmuuttajasta (Danfoss Drives A/S 2000, 52)

Tasasuuntaajaa muuttaa yksi- tai kolmivaiheisen verkkojännitteen sykkiväksi tasajännitteeksi. Tasasuuntaajaan tulevalla jännitteellä on kiinteä taajuus, joka Suomessa on 50 Hz. Välipiirejä on kolmenlaisia. Välipiiristä tasasuuntaajalta tullut sykkivä tasajännite stabiloidaan tai muunnetaan tasavirraksi tai muutetaan vaihtojännitteeksi. Lopullinen moottorille menevän jännitteen taajuus määrittyy vaihtosuuntaajassa. Tämän taajuuden mukaan moottorin pyörimisnopeus muuttuu. Ohjauspiirin avulla käyttäjä voi lähettää komentoja tasasuuntaajalle, välipiirille ja vaihtosuuntaajalle. Näillä komennoilla käyttäjä voi vaikuttaa moottorin pyörimisnopeuteen haluamallaan tavalla. (Danfoss Drives A/S 2000, 52–53.)

4 NOSTUREIDEN RAKENTEIDEN VERTAILU

Tässä luvussa kerrotaan tällä hetkellä käytössä olevasta nosturista, siitä millainen se on ja mitkä ovat sen huonoja puolia. Tämän lisäksi kerrotaan opinnäytetyössä suunniteltavan uuden nosturin ominaisuuksista ja vaatimuksista.

4.1 Käytössä olevan nosturin esittely

Nykyinen nosturi on ollut käytössä kaksi vuotta (kuva 12). Nosturin korkeus on 4,8 metriä ja sen osat ovat rautaa. Maasta nosturin pystypalkki on tuettu neljällä vaakatasossa olevalla L-palkilla, jotka ovat 2 metriä pitkiä. L-palkit muodostavat ylhäältäpäin katsottuna ristimäisen tuen nosturin pystypalkille. Nosturin pystypalkki on koottu neljästä noin metrin mittaisesta palkista, jotka on kiinnitetty toisiinsa pulteilla ja muttereilla. Pystypalkki on tuettu vielä vinopalkeilla maassa olevista L-palkeista. Pystypalkin yläosaan on kiinnitetty 3,5 metriä pitkä ovikisko, johon on kiinnitetty liikuteltava sähkövaijeritalja. (Norosoja 2016.)



KUVA 12. Nykyinen nosturi (Kuvaaja: Leo Norosoja 2016)

Taljan maksimi nostokuorma on 400 kg. Kisko on tuettu nosturin pystypalkkiin kahdella vaijerilla, joilla saadaan estettyä kiskoa taipumasta, kun taljalla nostetaan kuormaa. Sähkötaljaan on kiinnitetty kaksi ovirullastoa, joissa on molemmissa neljä ovirullaa. Rullien ansiosta sähkötaljaa voidaan vetää manuaalisesti halutulle etäisyydelle nosturin pystypal-

kista. Ovikisko pystytään pyörittämään nosturin pystypalkin akselin ympäri kahden sisäkkäisen putken ansiosta. Sisäkkäiset putket toimivat pystypalkin yläpäässä liukulaakerin tapaan. Kisko on neljän metrin korkeudella maasta, eli tällä nosturilla voidaan pystyttää enintään neljä metriä korkeita kehikoita. Hirsiä nostetaan sähkötaljan koukkuun ja hirsii kiinnitettävillä liinoilla. (Norosoja 2016.)

Nykyisin käytössä oleva nosturi on vaikeakäyttöinen ja epäturvallinen. Sähkötaljan ohjauskapulaa käytettäessä käyttäjä joutuu seisomaan nostettavan kuorman välittömässä läheisyydessä tai sen alla. Asiaa on parannettu laittamalla sähkötaljan ja ohjainkapulan väliin pidempi sähkökaapeli. Näin ongelmaa ei ole kuitenkaan saatu täysin poistettua. Työasento ei ole ergonominen, koska se rasittaa selkää ja hartioita. Kuvassa 13 näkyy sähkövaijeritaljan käytön ongelmallisuus. (Norosoja 2016.)

Käytössä olevan nosturin ovikisko joustaa päästä kuormaa nostettaessa. Kiskon joustaminen aiheuttaa hirren vaappumisen ylös alas sitä nostettaessa. Vanhan nosturin rakenteille ei ole laskettu minkäänlaisia lujuuslaskelmia vaan nosturi on rakennettu tuntuman perusteella. Vaarana on esimerkiksi, että ovikisko tai muut nosturin rakenteet pettävät, kun nosturia käytetään. Vanhan nosturin huonona puolena sanottiin olevan myös se, että hirren vaakatasossa tapahtuvan liikuttamisen joutui tekemään manuaalisesti. Vertikaalinen liike saatiin aikaan sähkötaljan avulla. Yrittäjän mukaan painavan kuorman vaakatasossa liikuttaminen oli haastavaa ja tilanteessa jossa kuorma putoaisi, se olisi vaarallista. (Norosoja 2016.)



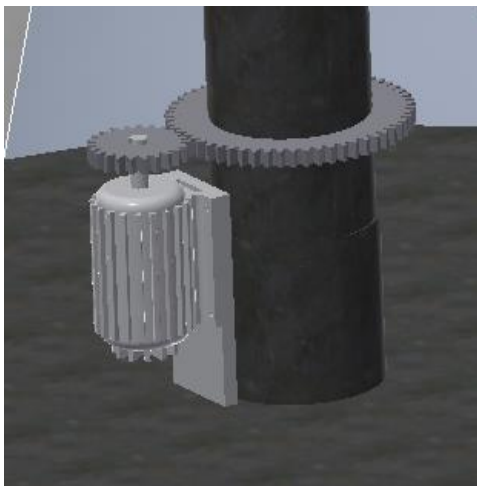
KUVA 13. Nosturin sähkövaijeritalja ja liinat (Kuvaaja Leo Norosoja 2016)

4.2 Suunniteltavan nosturin ominaisuudet ja vaatimukset

Uusi nosturi suunniteltiin nostamaan maksimissaan 250 kg:n painoista kuormaa. Hirret, joita nosturilla nostetaan, ovat enintään tämän painoisia. Tämän pohjalta tehtiin vaadittavat lujuuslaskelmat nosturin puomille ja pystypalkille ja mitoitettiin rakenteet laskelmien mukaan. Nosturin puomiksi valittiin IPE-palkki ja pystypalkiksi teräsputki.

Nosturiin valittiin sähkövaijeritaljan sijaan sähköketjutalja, joka on tukevampi verrattuna nykyiseen vaijeritaljaan. Sähköketjutaljalla pystytään nostamaan kuormaa tasaisemmin verrattuna sähkövaijeritaljaan. Sitä voidaan ohjata kaukosäätimellä, jolloin kuormaa pystytään nostamaan turvalliselta etäisyydeltä ja huomioimaan samalla myös ympäristöä paremmin. Sähköketjutalja moottoroidaan pystypalkilta tulevaan IPE-palkkiin, jolloin kuormaa voidaan siirtää pystypalkkiin nähden vaakatasossa myös kauko-ohjaamalla manuaalisen siirron sijaan. Tähän tarvitaan sähkösiirtovaunu. Hirsiä nostetaan sähköketjutaljan koukkuun ja hirsii kiinnitettävillä liinoilla samaan tapaan kuin vanhalla nosturilla.

Myös nosturin pystypalkille tulee moottoriohjaus, jolla pystypalkkia pyöritetään akselin ympäri ja samalla puomi pyörii. Pystypalkin pyörimisliike toteutetaan sähkömoottorin ja hammaspyörien avulla, kuten on esitetty kuvassa 14. Yrittäjän mukaan nosturi ei saa pyöriä ympäri liian lujaa vauhtia, ettei hirsi lähde heilumaan sitä liikuttaessa. Sopiva nopeus pyörimisliikkeelle on alle 10 kierrosta minuutissa. Nosturin rungon rakenteista tehdään niin tukevat, ettei nosturi pääse joustamaan liikaa kuormaa nostettaessa. Pystypalkki tuetaan ja laakeroidaan liukulaakerilla kahdesta kohtaa. Tuennalla estetään nosturin kaatuminen kuormaa nostettaessa ja laakeroinnilla mahdollistetaan pystypalkin pyörimisliike.



KUVA 14. Hammaspyörätoteutus

Uusi nosturi suunniteltiin siten, että sillä voi nostaa rakennuksen harjahirren neljän metrin korkeuteen. Puomin tulee olla samanpituisen kuin nykyisessä nosturissa eli neljä metriä. Uudella nosturilla pystytään kokoamaan maksimissaan 8 x 8 x 4-metrisiä rakennuksia. Uuden nosturin 3D-malli on esitetty kuvassa 15.



KUVA 15. Nosturin 3D-malli

5 LUJUUSLASKUT

Tässä luvussa kerrotaan, miten nosturin metalliosien lujuudet lasketaan. Lisäksi tutkitaan Autodesk Inventor -ohjelman avulla nosturin kestävyyttä. Autodesk Inventor -ohjelmalla mallinnettiin nosturista 3D-malli, jonka kestävyyttä testattiin ohjelman Stress Analysis -toiminnolla.

5.1 Pistekuormitus

Pistekuormituksella tarkoitetaan johonkin pisteeseen kohdistuvaa voiman vaikutusta. Nostettaessa kuormaa nosturilla aiheutuu nosturin pystypalkin keskiakselille momentti. Momentin suuruus on sama keskiakselin jokaisessa pisteessä. Pistekuormituksen aiheuttama momentti lasketaan kaavalla 4 (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2012, 147).

$$M = Fl \tag{4}$$

Kaavassa 4 F tarkoittaa voiman suuruutta ja l tarkoittaa voiman etäisyyttä pisteestä, johon voiman vaikutusta tutkitaan. Eli tässä tapauksessa sillä tarkoitetaan etäisyyttä pystypalkin keskiakselista. Voiman suuruus F lasketaan kaavalla 5 (Mäkelä ym. 2012, 91).

$$F = mg \tag{5}$$

Kaavassa 5 m tarkoittaa nosturilla nostettavan kuorman massaa ja g tarkoittaa putoamis- kiihtyvyyttä. Suurinta nosturin IPE-palkin päähän kohdistuvaa voimaa laskettaessa massaan on huomioitava sähköketjutaljan massa.

Uuden nosturin IPE-palkin päähän aiheutuva pistekuorman maksimimomentti lasketaan kaavojen 4 ja 5 avulla seuraavasti.

$$M = 310 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 4 \text{ m} = 12164,4 \text{ Nm}$$

Maksimimomenttia laskettaessa käytettiin maksimi nostoetäisyyttä pystypalkista (4 m) sekä huomioitiin sähkötaljan massa (60 kg).

5.2 Tasainenkuormitus

IPE-palkin omamassa aiheuttaa momentin nosturin pystypalkin akselille. Tämä momentti lasketaan kaavalla 6 (Mäkelä ym. 2012, 147).

$$M = \frac{Fl}{2} \quad (6)$$

Kaavassa 6 F on IPE-palkin massa kerrottuna putoamiskiihtyvyydellä kaavan 5 mukaisesti. Kaavassa 6 l tarkoittaa palkin pituutta, joka uudessa nosturissa on neljä metriä.

5.3 Myötöraja ja sallittu jännitys

Myötörajalla tarkoitetaan suurinta sallittua jännitystä, joka materiaaliin saa kohdistua, ennen kuin siinä tapahtuu pysyviä muodonmuutoksia. Pysyvien muodonmuutosten jälkeen kappale ei enää palaudu ennalleen vaan jää muuttuneeseen muotoon. Nosturin teräsrakenteissa käytetään terästä S355, jonka myötöraja on 355 N/mm^2 . Nosturin rakenteisiin saa siis kohdistua 355 N/mm^2 suuruinen jännitys ennen pysyvien muodonmuutosten syntymistä. Nosturin varmuuskertoimeksi valittiin 4, joka on käytetty varmuus nostolaitteissa. Tällöin sallittu jännitys on neljäsosa teräksen myötörajasta eli $88,75 \text{ N/mm}^2$.

5.4 Taivutusvastus

Taivutusvastus kuvaa kappaleen kykyä vastustaa taipumaa. Taivutusvastus riippuu kappaleen muodosta, joten esimerkiksi ympyränmuotoisella kappaleella on eri taivutusvastus kuin neliönmuotoisella kappaleella. Taivutusvastus voidaan laskea, mutta sen voi myös katsoa taulukoista. Erimuotoisille kappaleille on olemassa omat kaavansa taivutusvastusten laskemiseen. Esimerkiksi ympyrärenkaan taivutusvastus lasketaan kaavalla 7 (Mäkelä ym. 2012, 145).

$$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} \quad (7)$$

Kaavassa 7 D tarkoittaa ympyrärenkaan ulkohalkaisijaa ja d sisähalkaisijaa.

Vaadittava minimi taivutusvastus voidaan laskea momentin M ja jännityksen σ avulla kaavalla 8 (Mäkelä ym. 2012, 147).

$$W = \frac{M}{\sigma} \quad (8)$$

Nosturin puomiksi tulevan IPE-palkin minimi taivutusvastus saadaan laskettua seuraavasti, kun taivutusmomentti ja sallittu jännitys ovat tiedossa.

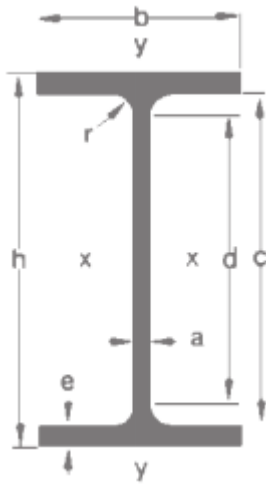
$$W = \frac{12164400 \text{ Nmm}}{88,75 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 137064 \text{ mm}^3 = 137 \text{ cm}^3$$

Taulukosta 2 nähdään, että pienin IPE-palkki, jolla on vähintään tämä taivutusvastus, on IPE 180 -palkki. Sillä taivutusvastus on 146 cm^3 . Nosturiin valittiin tämä ensimmäinen vaadittavan taivutusvastuksen täyttävä palkki.

TAULUKKO 2 IPE-palkkien mittoja ja arvoja (Ksteel 2014)

| S235JRG2/ S355J2H TANKOPITUUS 12M | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------|-----|-----|------|------------------|------------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-------|--|
| KOKO | MITAT JA PAINOT | | | | STAATTISET ARVOT | | | | | | | | | | |
| | h | b | a | e | r | Vaippa | Poikki pinta | Paino | I_x | W_x | i_x | I_y | W_y | i_y | |
| | mm | mm | mm | mm | mm | m ^{2/m} | cm ² | kg/m | cm ⁴ | cm ³ | cm | cm ⁴ | cm ³ | cm | |
| 80 | 80 | 46 | 3,8 | 5,2 | 5 | 0,328 | 7,6 | 6,0 | 80 | 20,0 | 3,24 | 8,5 | 3,69 | 1,05 | |
| 100 | 100 | 55 | 4,1 | 5,7 | 7 | 0,400 | 10,3 | 8,1 | 171 | 34,2 | 4,07 | 15,9 | 5,79 | 1,24 | |
| 120 | 120 | 64 | 4,4 | 6,3 | 7 | 0,475 | 13,2 | 10,4 | 318 | 53,0 | 4,90 | 27,7 | 8,65 | 1,45 | |
| 140 | 140 | 73 | 4,7 | 6,9 | 7 | 0,551 | 16,4 | 12,9 | 541 | 77,3 | 5,74 | 44,9 | 12,3 | 1,65 | |
| 160 | 160 | 82 | 5,0 | 7,4 | 9 | 0,623 | 20,1 | 15,8 | 869 | 109 | 6,58 | 68,3 | 16,7 | 1,84 | |
| 180 | 180 | 91 | 5,3 | 8,0 | 9 | 0,698 | 23,9 | 18,8 | 1320 | 146 | 7,42 | 101 | 22,2 | 2,05 | |
| 200 | 200 | 100 | 5,6 | 8,5 | 12 | 0,768 | 28,5 | 22,4 | 1940 | 194 | 8,26 | 142 | 28,5 | 2,24 | |
| 220 | 220 | 110 | 5,9 | 9,2 | 12 | 0,848 | 33,4 | 26,2 | 2770 | 252 | 9,11 | 205 | 37,3 | 2,48 | |
| 240 | 240 | 120 | 6,2 | 9,8 | 15 | 0,922 | 39,1 | 30,7 | 3890 | 324 | 9,97 | 284 | 47,3 | 2,69 | |
| 270 | 270 | 135 | 6,6 | 10,2 | 15 | 1,04 | 45,9 | 36,1 | 5790 | 429 | 11,2 | 420 | 62,2 | 3,02 | |

IPE-palkkien mittoja vastaavat kirjaimet nähdään kuvasta 16. Kuvan 16 ja taulukon 2 avulla nähdään, että IPE 180 -palkin korkeus on 180 mm, leveys on 91 mm ja ainevahvuudet ovat 5,3 mm ja 8 mm.



KUVA 16. IPE-palkin mitat (Ksteel 2014)

Nosturin pystypalkki tehdään teräsputkesta. Teräsputken taivutusvastusta laskettaessa on huomioitava kuorman aiheuttaman taivutusmomentin lisäksi IPE 180 -palkin omanmassan aiheuttama momentti. IPE-palkin aiheuttama momentti lasketaan kaavalla 6. IPE 180 -palkki painaa taulukon 2 mukaan 18,8 kg/m eli palkin kokonaispainoksi saadaan 75,2 kg. Palkin oman massan aiheuttama taivutusmomentti on

$$M = \frac{75,2 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 4 \text{ m}}{2} = 1475,4 \text{ Nm}$$

Palkkiin kohdistuvan maksimikuorman ja palkin yhteensä aiheuttama maksimi taivutusmomentti on 13639,8 Nm. Teräsputken vaadittava minimi taivutusvastus saadaan lasketua kaavalla 8.

$$W = \frac{13639800 \text{ Nmm}}{88,75 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 153688 \text{ mm}^3 = 154 \text{ cm}^3$$

Taulukosta 3 nähdään, että teräsputken taivutusvastukseen vaikuttaa putken ainevahvuus sekä putken ulkohalkaisija. Putken ainevahvuuden kasvaessa taivutusvastus kasvaa, vaikka putken ulkohalkaisija pysyy samana. Samaan tapaan putken ulkohalkaisijan kasvaessa taivutusvastus kasvaa, vaikka ainevahvuus pysyisi samana. Taulukosta 3 nähdään, että ensimmäinen putki, joka saavuttaa taivutusvastuksen 154 cm³, on ulkohalkaisijaltaan 168,3 mm ja ainevahvuudeltaan 8 mm. Nosturiin valittiin ulkohalkaisijaltaan 219,1 mm ja ainevahvuudeltaan 5 mm oleva putki. Valitun putken taivutusvastus on 176 cm³, jolla täytetään minimi taivutusvastuksen vaatimukset.

TAULUKKO 3 Teräsputkien mittoja ja arvoja (Begroup)

| Ulkomitta | Paksuus | Paino | Poikki- pinta-ala | Jäyhyys- momentti | Jäyhyys- säde | Taivutus- vastus | Plastinen taivutus- vastus | Vääntöjäyhyys- momentti | Ulko- puolinen pinta-ala | Noin pituus /tonni | |
|-----------|---------|-------|----------------------|----------------------|------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------|------|
| D | T | M | A | I | i | W_{el} | W_{pl} | I_t | C_t | | |
| mm | mm | kg/m | cm ² | cm ⁴ | cm | cm ³ | cm ³ | cm ⁴ | cm ³ | m ² /m | m |
| 168,3 | 4 | 16,2 | 20,6 | 697 | 5,81 | 82,8 | 108 | 1394 | 166 | 0,529 | 61,7 |
| | 5 | 20,1 | 25,7 | 856 | 5,78 | 102 | 133 | 1712 | 203 | 0,529 | 49,7 |
| | 6 | 24 | 30,6 | 1009 | 5,74 | 120 | 158 | 2017 | 240 | 0,529 | 41,6 |
| | 8 | 31,6 | 40,3 | 1297 | 5,67 | 154 | 206 | 2595 | 308 | 0,529 | 31,6 |
| | 10 | 39 | 49,7 | 1564 | 5,61 | 186 | 251 | 3128 | 372 | 0,529 | 25,6 |
| | 12,5 | 48 | 61,2 | 1868 | 5,53 | 222 | 304 | 3737 | 444 | 0,529 | 20,8 |
| 193,7 | 4 | 18,7 | 23,8 | 1073 | 6,71 | 111 | 144 | 2146 | 222 | 0,609 | 53,4 |
| | 4,5 | 21 | 26,7 | 1198 | 6,69 | 124 | 161 | 2395 | 247 | 0,609 | 47,6 |
| | 5 | 23,3 | 29,6 | 1320 | 6,67 | 136 | 178 | 2640 | 273 | 0,609 | 43 |
| | 6 | 27,8 | 35,4 | 1560 | 6,64 | 161 | 211 | 3119 | 322 | 0,609 | 36 |
| | 8 | 36,6 | 46,7 | 2016 | 6,57 | 208 | 276 | 4031 | 416 | 0,609 | 27,3 |
| | 10 | 45,3 | 57,7 | 2442 | 6,5 | 252 | 338 | 4883 | 504 | 0,609 | 22,1 |
| 219,1 | 12,5 | 55,9 | 71,2 | 2934 | 6,42 | 303 | 411 | 5869 | 606 | 0,609 | 17,9 |
| | 4,5 | 23,8 | 30,3 | 1747 | 7,59 | 159 | 207 | 3494 | 319 | 0,688 | 42 |
| | 5 | 26,4 | 33,6 | 1928 | 7,57 | 176 | 229 | 3856 | 352 | 0,688 | 37,9 |
| | 6 | 31,5 | 40,2 | 2282 | 7,54 | 208 | 273 | 4564 | 417 | 0,688 | 31,7 |
| | 8 | 41,6 | 53,1 | 2960 | 7,47 | 270 | 357 | 5919 | 540 | 0,688 | 24 |
| | 10 | 51,6 | 65,7 | 3598 | 7,4 | 328 | 438 | 7197 | 657 | 0,688 | 19,4 |
| 244,5 | 12 | 61,3 | 78,1 | 4200 | 7,33 | 383 | 515 | 8400 | 767 | 0,688 | 16,3 |
| | 12,5 | 63,7 | 81,1 | 4345 | 7,32 | 397 | 534 | 8689 | 793 | 0,688 | 15,7 |
| | 16 | 80,1 | 102 | 5297 | 7,2 | 483 | 661 | 10590 | 967 | 0,688 | 12,5 |
| | 5 | 29,5 | 37,6 | 2699 | 8,47 | 221 | 287 | 5397 | 441 | 0,768 | 33,9 |
| | 6 | 35,3 | 45 | 3199 | 8,43 | 262 | 341 | 6397 | 523 | 0,768 | 28,3 |
| | 8 | 46,7 | 59,4 | 4160 | 8,37 | 340 | 448 | 8321 | 681 | 0,768 | 21,4 |
| 244,5 | 10 | 57,8 | 73,7 | 5073 | 8,3 | 415 | 550 | 10150 | 830 | 0,768 | 17,3 |
| | 12 | 68,8 | 87,7 | 5938 | 8,23 | 486 | 649 | 11880 | 972 | 0,768 | 14,5 |
| | 12,5 | 71,5 | 91,1 | 6147 | 8,21 | 503 | 673 | 12290 | 1006 | 0,768 | 14 |
| | 16 | 90,2 | 115 | 7533 | 8,1 | 616 | 837 | 15070 | 1232 | 0,768 | 11,1 |

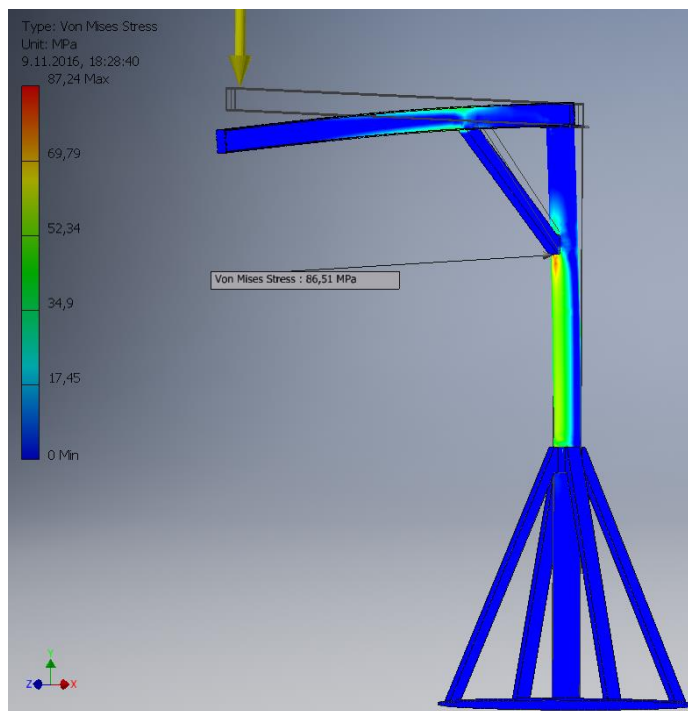
5.5 Autodesk Inventor ja Stress Analysis

Autodesk Inventor on ohjelma, jolla pystyy mallintamaan 3D-malleja kappaleista sekä tekemään piirustuksia ja kokoonpanoja mallinnetuista kappaleista. Autodesk Inventorissa on Stress Analysis -toiminto, jonka avulla pystyy simuloimaan mallinnettua kappaletta ja näkemään, miten esimerkiksi kappaleeseen kohdistuvat voimat vaikuttavat sen rakenteisiin. Stress Analysis -toiminto antaa tiedot Von Mises -jännityksestä, tärkeimmistä jännityksistä, siirtymästä ja varmuuskertoimesta. Von Mises -jännitys kertoo suurimman jännityksen, joka kappaleeseen kohdistuu. Tärkeää on, että tämä jännitys on selvästi pienempi kuin teräksen myötöraja, joka nosturin teräksillä on 355 Mpa. Tällöin saadaan myös varmuutta rakenteille. (Autodesk 2014.)

Nosturissa IPE-palkin päähän kohdistuva voima saadaan laskettua kaavan 4 avulla. Laskettaessa käytetään maksimikuormaa, joka kohdistuu palkin päähän, eli myös sähköketjutaljan paino huomioidaan.

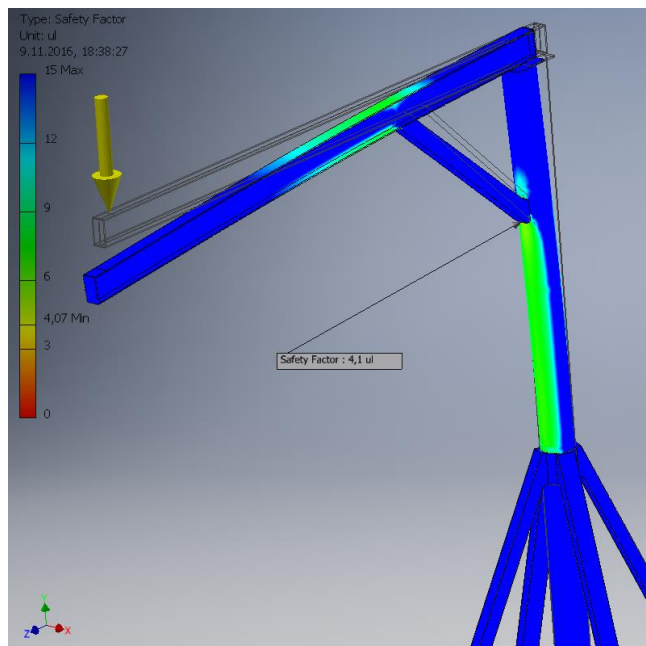
$$F = 310 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3041,1 \text{ N}$$

Testattaessa Autodesk Inventorilla mallinnettua 3D-mallia voimalla 3100 N saatiin Von Mises -jännitykseksi 87,2 Mpa ja varmuuskertoimeksi 4,07. Suurin Von Mises -jännitys kohdistuu pystypalkkiin kohtaan, josta lähtee tuki IPE-palkille (kuva 17). Kuvassa 17 punainen väri kuvaa suurinta jännitystä ja sininen pienintä. Keltainen nuoli IPE-palkin päässä kuvaa kohtaa, johon voima vaikuttaa.



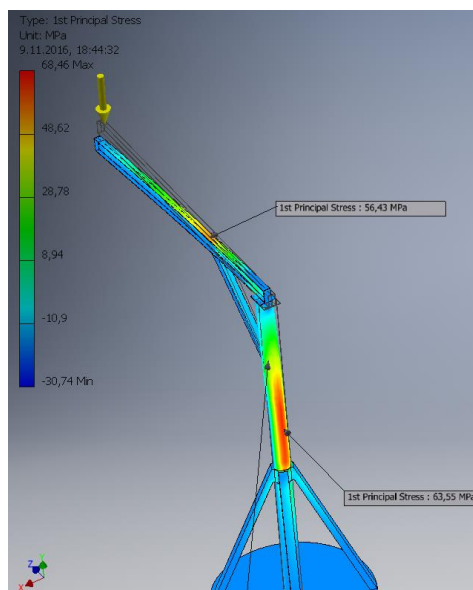
KUVA 17. Von Mises -jännitys

Varmuuskertoimen on oltava yli 1, jotta rakenne kestää teoreettisesti. Varmuuskertoimen on kuitenkin hyvä olla suurempi, että vältetään mahdollisilta rakenteiden hajoamisilta ja tapaturmilta. Stress Analysis -toiminnolla saatu varmuuskerroin on sama kuin osia mitoitettaessa valittu kerroin, mikä on riittävä. Varmuuskerroin on esitetty kuvassa 18. Kuvassa 18 sininen väri kuvaa suurinta varmuuskertoimen aluetta ja punainen väri kuvaa aluetta, missä on pienin varmuuskerroin. Kuvasta 18 nähdään, että pienin varmuuskerroin on samassa kohdassa, mihin kohdistui suurin Von Mises -jännitys. Tämä tarkoittaa, että tästä kohdasta nosturi pettää ensimmäisenä, jos sillä nostetaan liian suurta kuormaa.



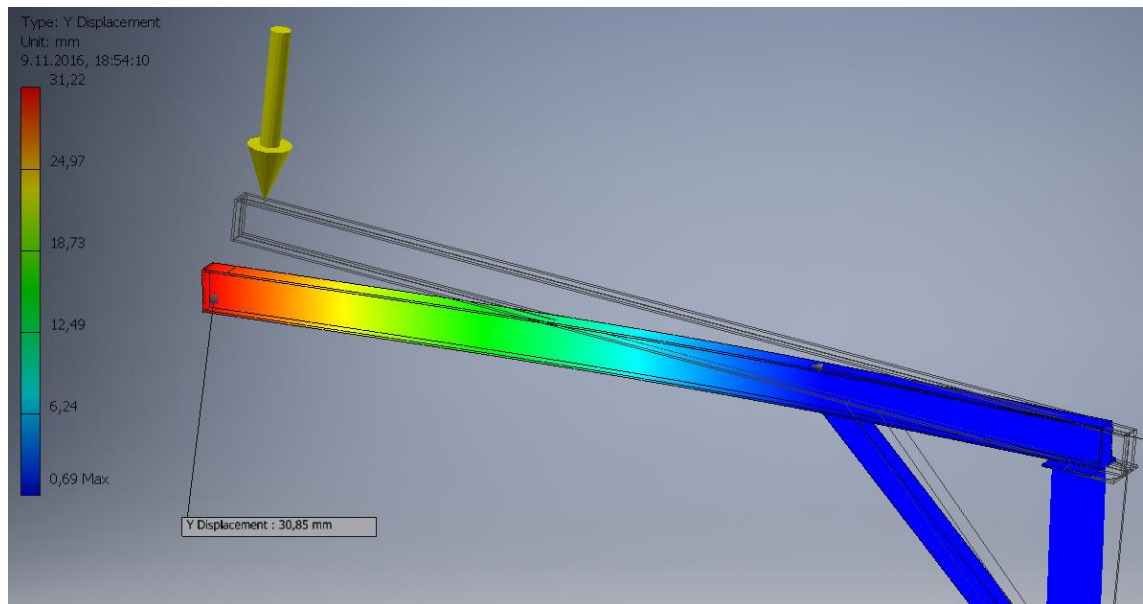
KUVA 18. Varmuuskerroin

Tärkeimmät jännitysalueet nähdään kuvasta 19. Siinä punaisille alueille kohdistuvat jännitykset ovat suurimpia ja sinisille alueille kohdistuvat ovat pienimpiä. Suurimmat jännitykset kohdistuvat pystypalkin takapintaan ja IPE-palkin päälle vinotuen yläpuolelle. Näillä alueilla jännitykset ovat 40–60 Mpa. Nämä jännitykset eivät ole yhtä suuria kuin Von Mises -jännitys, mutta ne ovat tärkeitä, kun tutkitaan, mihin muualle syntyy suuria jännityksiä kuormaa nostettaessa.



KUVA 19. Suurimpia jännityksiä

IPE-palkki taipuu alaspäin ja pystypalkki kuormaa kohti voiman vaikuttaessa. Alaspäin taipuma on 31 mm ja sivusuunnassa 11 mm. Taipumat eivät ole kovin suuria, mutta taipumaa voidaan halutessa vähentää viemällä vinotukea lähemmäs IPE-palkin voiman vaikutuspisteen puoleista päätä. Tällöin nosturilla kasattavien kehikoiden enimmäiskorkeus pienenee, koska vinopuu ottaa määrätysssä kohtaa seinähirsiin kiinni. Kuvasta 20 nähdään siirtymän vaikutusta nosturiin. Kuvassa 20 punainen väri tarkoittaa suurinta siirtymää ja sininen väri pienintä.



KUVA 20. Voiman vaikutus siirtymään

Autodesk Inventorilla testatussa 3D-mallissa käytettiin nosturin puomina IPE 180 -palkkia, ja pystypalkkina käytettiin valittua teräsputkea. Stress Analysis antamista tuloksista huomattiin, että valittu palkki ja putki kestävät maksimikuorman myös koottuna. Nosturin muut teräsosat antavat lisäksi tukea nosturin rakenteille.

6 TARVITTAVAT KOMPONENTIT

Tässä luvussa kerrotaan, mitä komponentteja ja laitteita uuden nosturin rakentaminen vaatii. Lisäksi on kerrottu hinta-arvio ja selitetty, miten nosturi kootaan sekä koottu työ-
turvallisuusohjeita.

6.1 Teräsosat

Nosturin puomi on 4 metriä pitkä IPE 180 -palkki. IPE-palkin mitat on esitetty kuvassa 16 sekä liitteessä 2. IPE-palkin molempiin päihin tulee 180 x 91 x 5 mm kokoiset teräslevyt tukevoittamaan rakennetta ja estämään sähköketjutaljaa tippumasta. Nosturin pystypalkki tehdään pyöreästä rakenneputkesta, jonka pituus on 4,5 m, ainevahvuus 5 mm ja ulkohalkaisija 219,1 mm. Pystypalkki on esitetty liitteessä 3. Pystypalkin päälle tulee 222 x 222 mm kokoinen teräslevy, jonka ainevahvuus on 10 mm. Nosturin maata vasten oleva tuki koostuu ympyrän muotoisesta pohjalevystä, jonka halkaisija on 2 m ja ainevahvuus 8 mm. Pohjalevyn keskellä on 200 mm mittainen pyöreä rakenneputki, johon pystypalkki laakeroidaan liukulaakerin avulla. Tämän rakenneputken ainevahvuus on 8 mm ja sisähalkaisija 220 mm.

Nosturin pystypalkki tuetaan puolesta välistä kuvan 15 mukaisella tuella. Tämä tuki rakennetaan neliöputkesta ja pyöreästä rakenneputkesta. Pystypalkin ja tuen väliin tulee samanlainen laakerointi kuin pystypalkin alapäähän. Tällöin nosturi pääsee pyörimään ympäri 360 astetta tuen sisällä. Nosturin pystypalkin ja IPE-palkin väliin tulee vinotuki, joka tehdään neliön muotoisesta rakenneputkesta. Neliöputken mitat ovat 90 x 90 x 5 mm ja pituus yksi metri. Sähkömoottori kiinnitetään teräslevyyn, jonka mitat saadaan selvitettyä tarkemmin vasta nosturin kokoamisen yhteydessä.

6.2 Moottori ja sähköketjutalja

Sähköketjutaljaksi valittiin CarlStahlin valmistama talja (kuva 21), jonka maksimi nostokuorma on 250 kg. Sähköketjutaljaan tilataan sähkösiirtovaunun lisäksi lisäosana mini-

rc-radio-ohjaus, jolloin taljaa voidaan käyttää langattomasti. Kuvassa 21 on pelkkä sähköketjutalja ilman sähkösiirtovaunua, ja siinä on kaapelin päässä oleva ohjauskapula. Sähkösiirtovaunua tilattaessa ilmoitetaan IPE-palkin laipan leveys (91 mm), jotta siirtovaunu säädetään liikkeessä valmiiksi tähän mittaan.



KUVA 21. Sähköketjutalja (CarlStahl)

Hammasyöräparia pyörittämään on jo hankittu kolmivaihe sähkömoottori (kuva 22), jossa on vaihde. Vaihteen ansiosta vaihteelta tulevan akselin pyörimisnopeus on saatu laskettua 8,9 kierrokseen minuutissa. Sähkömoottorin teho on 0,250 kW. Moottorin pyörimisnopeus on 1330 kierrosta minuutissa. Vaihteelta tulevan akselin halkaisija on 35 mm. Moottori saadaan kiinnitettyä pulteilla kuvassa 22 näkyvistä moottorin vaihdelaatikon jalustassa olevista rei'istä.



KUVA 22. Vaihdemoottori (Kuvaaja: Leo Norosoja 2016)

6.3 Hammaspyöräpari

Nosturiin teetetään liitteen 4 mukainen hammaspyöräpari. Hammaspyöräpari on mallinnettu Autodesk Inventorilla. Hammaspyöräpari tehdään laserleikkaamalla 12 mm vahvasta teräslevystä. Autodesk Inventorilla tehty tiedosto syötetään laserleikkuriin, joka leikkaa teräslevystä liitteen 4 mukaisen hammaspyöräparin. Pienempi hammaspyörä tulee kiinni vaihdemoottorin akseliin, ja isompi tulee kiinni nosturin pystypalkkiin. Hammaspyöräparissa isommassa eli käytettävässä pyörässä on 54 hammasta ja pienemmässä eli käytettävässä pyörässä on 27 hammasta. Kaavalla 3 laskemalla hammaspyöräparin välityssuhteeksi saadaan 0,5. Tällöin isompi hammaspyörä pyörii puolet hitaammin kuin pienempi hammaspyörä. Pienemmän hammaspyörän pyörimisnopeus on sama kuin moottorin vaihteelta tulevan akselin pyörimisnopeus eli 8,9 kierrosta minuutissa. Tällöin isompi hammaspyörä ja samalla nosturin pystypalkki pyörivät 4,45 kierrosta minuutissa.

Isomman hammaspyörän keskellä on halkaisijaltaan 220 mm oleva reikä. Pienemmän hammaspyörän keskellä on halkaisijaltaan 35 mm oleva reikä, joka vastaa vaihdemoottorin akselin halkaisijaa. Pienempi hammaspyörä kiinnitetään kiilalla moottorin vaihteelta tulevan akselin päähän, joten hammaspyörään täytyy tehdä myös kiilan kokoinen ura. Uran koko varmistuu, kun vaihdemoottoria päästään mittaamaan. Hammaspyörinä käytetään suorahampaisia lineaarihammaspyöriä. Hammaspyörien keskikohtien välinen etäisyys on 202,5 mm ja moduuli on 5 mm.

6.4 Taajuusmuuttaja

Moottoriin kytketään kiinni taajuusmuuttaja, jonka avulla taajuutta säätämällä moottorin ja samalla pystypalkin pyörimisnopeutta voidaan muuttaa halutulla tavalla suuremmaksi tai pienemmäksi. Moottori ja taajuusmuuttaja ostettiin Hautalan sähkömoottori Oy:stä. Liikkeen myyjän mukaan taajuusmuuttajalla ei saa säätää taajuutta alle 20 hertsin, koska ostetussa moottorissa ei ole lisätuuletinta. Näin estetään moottorin ylikuumeneminen. 20 hertsillä moottorin pyörimisnopeus saadaan alenemaan noin puoleen, jolloin pystypalkin pyörimisnopeus on kaksi kierrosta minuutissa. Moottorin kuumentumisen takia taajuutta ei saa myöskään nostaa liian suureksi. Ilman lisätuuletinta nosturin pystypalkki saadaan pyörimään 2–12 kierrosta minuutissa. Tämä pyörimisnopeuden vaihteluväli on riittävä

pystypalkin ohjaukseen. Testaamalla nähdään, mikä pyörimisnopeus on paras, kun hirsiiä liikutetaan.

Taajuusmuuttaja on arka pölylle, joten se on koteloitava esimerkiksi seinään kiinni. Taajuusmuuttajaan ostettiin kaapelin päässä oleva kapula, jolla taajuusmuuttajaa voidaan ohjata kauempaa, eikä käyttäjän tarvitse seistä taajuusmuuttajan vieressä kääntäessään nosturin pystypalkkia.

6.5 Nosturin kokoaminen

Uusi nosturi kootaan vuonna 2015 valmistuneeseen uuteen konehalliin. Konehalli on kylmätila ja se on pinta-alaltaan 220 m². Nosturille valitaan paikka johon se halutaan sijoittaa, eikä sitä ole tarkoitus purkaa tai liikutella valitusta paikasta kokoamisen jälkeen. (Norsoja 2016.)

Pohjalevy laitetaan tasaiselle alustalle sille kohtaa, mihin nosturi halutaan. Pohjalevyn keskelle hitsataan lyhempi pyöreä rakenneputki. Rakenneputken sisään asennetaan liukulaakeri. Pohjalevyyn hitsataan kiinni teräslevy, johon moottori kiinnitetään sekä tuki, joka tukee pystypalkkia sen keskikohdasta (kuvat 14 ja 15). Myös tähän tukeen asennetaan liukulaakeri. Teräslevyn paikka määritetään käyttämällä apuna hammaspyöriä ja moottoria. Liitteen 4 mukaan hammaspyörien keskikohtien välinen etäisyys on 202,5 mm, jonka avulla teräslevyn ja moottorin paikka saadaan määritettyä. Isompi hammaspyörä hitsataan kiinni pystypalkin alaosaan siten, että hammaspyörä tulee samalle korkeudelle kuin pienempi hammaspyörä. Pystypalkin yläpäähän hitsataan 222 x 222 mm kokoinen teräslevy. IPE-palkki hitsataan kiinni pystypalkin päähän hitsattuun teräslevyyn 90 asteen kulmaan pystypalkkiin nähden. Pystypalkin ja IPE-palkin väliin hitsataan vinotuki metrin mittaisesta neliöputkesta, jonka mitat ovat 90 x 90 x 5 mm.

Pystypalkki, johon on kiinnitetty IPE-palkki, nostetaan pystypalkin keskelle tulevan tuen ja liukulaakerin läpi pohjalevyn päällä olevan lyhemmän rakenneputken ja liukulaakerin sisään. Sähkösiirtovaunu ja sähköketjutalja nostetaan IPE-palkin alempaan laippaan. IPE-palkin päihin hitsataan 180 x 91 x 5 mm kokoiset teräslevyt tukevoittamaan rakennetta ja estämään sähköketjutaljan putoaminen sitä ohjattaessa.

Moottorin vaihteelta tulevaan akseliin kiinnitetään pienempi hammaspyörä kiilalla. Moottori kiinnitetään pulteilla ja muttereilla pohjalevyn päälle hitsattuun teräslevyyn siten, että hammaspyörät ovat kohdakkain ja vaakatasossa. Taajuusmuuttaja koteloidaan kiinni seinään ja kytketään moottoriin. Moottorille ja sähköketjutaljalle kytketään sähköt ja nosturia voidaan alkaa käyttää.

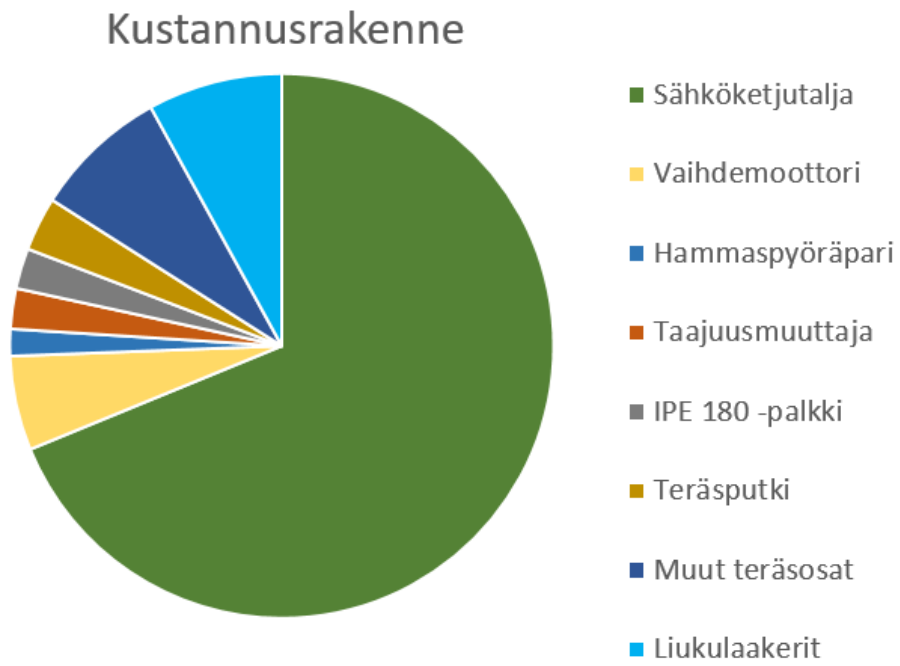
6.6 Kustannusarvio

Taulukossa 4 on esitetty nosturin hinta-arvio ja sen muodostuminen. Nosturin kokonais hinnaksi tulee arvion mukaan 6250 €. Hintoja on tarkasteltu eri yritysten verkkosivuilta sekä tiedosteltu suullisesti yritysten edustajilta paikanpäällä sekä sähköpostilla. Kaikki hinnat ovat alustavia arvioita. Kustannuksissa ei ole otettu huomioon nosturin kokoamiseen menevää työn osuutta. Tarkoituksena on, että yrittäjä kokoaa nosturin suurimmaksi osaksi itse, jolloin työstä ei aiheudu muuta kuin ajallisia kustannuksia yrittäjälle.

TAULUKKO 4. Nosturiin tulevien osien hinta-arvio eri yritysten hintavertailusta

| | |
|-----------------|----------------|
| Sähköketjutalja | 4 300 € |
| Vaihdemoottori | 350 € |
| Hammaspyöräpari | 100 € |
| Taajuusmuuttaja | 150 € |
| IPE 180 -palkki | 150 € |
| Teräsputki | 200 € |
| Muut teräsosat | 500 € |
| Liukulaakerit | 500 € |
| Yhteensä | 6 250 € |

Kuviosta 1 nähdään myös hinnan muodostumista ympyrädiagrammin avulla. Kuviosta 1 nähdään, että suurin osa kustannuksista muodostuu sähköketjutaljasta ja pienimpiä kustannuksia aiheutuu hammaspyöräparista ja taajuusmuuttajasta.



KUVIO 1. Nosturin kustannusrakenne ilman työosuutta

7 KONETURVALLISUUS

Tässä luvussa käsitellään koneturvallisuuteen liittyviä asioita, ja kerrotaan mitä asioita koneen valmistajan on otettava huomioon konetta suunnitellessaan ja hankkiessaan. Lisäksi kerrotaan mitä asioita on huomioitava nosturia käytettäessä.

7.1 Koneasetus

Koneasetuksella tarkoitetaan koneiden turvallisuuteen liittyviä asioita ja asetuksia, jotka koneen valmistajan on huomioitava. Koneasetuksen vaatimukset koskevat kaikkia koneita, eli myös omaan käyttöön rakennettavia koneita. Valmistajan on tehtävä koneelle riskianalyysi, jossa kartoitetaan kaikki mahdolliset turvallisuuteen liittyvät ongelmat, ja mietitään miten riskit saadaan minimoitua. Koneen valmistajan on suunniteltava ja rakennettava kone sitä koskevien turvallisuusvaatimusten mukaan. Valmistajan on lisäksi, laadittava koneelle käyttöohjeet, tekninen tiedosto, tehtävä vaatimustenmukaisuusvakuutus sekä kiinnitettävä koneeseen CE-merkintä ja tarvittavat muut merkinnät. (Työsuojeluhallinto 2008.)

Koneen tekninen tiedosto sisältää esimerkiksi koneen turvallisuuteen liittyviä asioita, piirustuksia koneesta ja kopion koneen käyttöohjeesta. Vaatimustenmukaisuusvakuudella koneen valmistaja takaa, että kone täyttää kaikki koneasetuksessa vaaditut konetta koskevat turvallisuusmääräykset. Kun koneelle on tehty vaatimustenmukaisuusvakuutus, siihen voidaan kiinnittää CE-merkintä. CE-merkintä osoittaa, että kone täyttää koneasetuksessa määrätyt turvallisuusvaatimukset. (Työsuojeluhallinto 2008.)

7.2 Käytössä huomioitavia ohjeita

Nosturia käytettäessä on otettava huomioon työturvallisuus. Seuraavassa on esitetty ohjeita liittyen nosturilla nostamiseen, nostettavaan kuormaan ja muihin nosturin osiin. Käyttäjän on noudatettava seuraavia ohjeita:

- Maksiminostokuorma on 250 kg.
- Nosturi ei ole henkilönostin, joten sillä ei saa nostaa ihmisiä.

- Kuorma on kiinnitettävä sähköketjutaljaan huolellisesti.
- Kuormaa nostettaessa ja siirrettäessä on pysyttävä turvallisella etäisyydellä kuormasta.
- Kuorman alle ei saa mennä missään tilanteessa.
- Muita henkilöitä ja ympäristöä on varottava nosturia käytettäessä.
- Kuormaa ei saa jättää riippumaan ylös vaan se on aina laskettava.
- Käytettävien liinujen kunto on tarkistettava säännöllisin väliajoin.
- Liinat on vaihdettava tarvittaessa.
- Pystypalkkia pyörittävät hammaspyörät on suojattava

8 POHDINTA

Nosturin suunnittelussa onnistuttiin hyvin, ja yritys sai yhden mahdollisen toteutustavan uudelle nosturille. Nosturi voidaan toteuttaa suunnitelman pohjalta tai siihen voidaan tehdä muutoksia, jos toteutusvaiheessa ilmenee asioita, joita suunnitelmassa ei otettu huomioon. Suunniteltu nosturi on käytännöllisempi ja vastaa paremmin yrityksen tämän hetkistä tarvetta vanhaan nosturiin verrattuna. Uutta nosturia käytettäessä työntekijän työ tulee helpommaksi ja ergonomisemmaksi, koska hirsiiin ei tarvitse koskea käsin niin paljon niitä siirreltäessä. Lisäksi sähköketjutaljan ohjaus toteutuu langattomasti uudessa nosturissa. Uutta nosturia voidaan pyörittää sähköisesti 360 astetta ympäri, sekä hirttä voidaan liikuttaa vaakatasossa sähkösiirtovaunun avulla. Vanhassa nosturissa nämä siirrot joudutaan tekemään käsin. Vanha nosturi säästetään pienempien ja kevyempien kehkoiden tekoa varten. Esimerkiksi tilanteessa, jossa kahta rakennusta tehdään samaan aikaan, on hyvä olla myös kaksi nosturia.

Lujuuslaskelmien ja Autodesk Inventor -ohjelman avulla saatiin luotettavia ja järkeviä tuloksia nosturin rakenteiden kestävydestä. Varmuuskertoimeksi rakenteelle saatiin neljä. Jos varmuuskerrointa halutaan saada suuremmaksi, nosturin rakenteita täytyy vahvistaa. Tulevaisuutta ajatellen voidaan nosturiin valita vahvempia komponentteja kuin suunnitelmassa esitetyt. Tällöin nostettavat kuormat voivat olla suurempia. Näin tehtäessä on kuitenkin laskettava uudestaan lujuuslaskelmat rakenteille ja testattava uutta rakennetta esimerkiksi Autodesk Inventorilla, jotta voidaan taata rakenteiden kestävyys. Nosturin IPE-palkin taipumaa voidaan vähentää lisäämällä toinen vinotuki IPE-palkin ja pystypalkin väliin tai siirtämällä suunniteltua vinotukea lähemmäksi voiman vaikutuspistettä.

Nosturiin voidaan jatkokehittää esimerkiksi kiskot, joiden avulla nosturia liikutetaan paikasta toiseen. Toinen vaihtoehto on suunnitella halliin kattonosturi, joka kulkee kiskoilla hallin päästä päähän. Kattonosturin avulla voitaisiin nostaa hirsiiä tai muuta kuormaa missä kohtaa hallia tahansa, eikä kehkion rakennuspaikka ole määrätty.

LÄHTEET

Ace Industries, Inc. 2016. HMI or ASME Hoist Duty Classifications.

Luettu 05.10.2016.

<https://www.aceindustries.com/t-reference-HMIorASMEHoistDutyClassifications.aspx>

Ansaharju, T. 2009. Koneenasennus ja kunnossapito. 1. painos. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy.

Autodesk. 2014. Interpret Results Contours. Luettu 30.10.2016.

<https://knowledge.autodesk.com/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Inventor-Help/files/GUID-5DBA4B4A-95E5-4484-AA38-05380B19A740-htm.html>

Begroup. Putkipalkit ja teräspuutket. Luettu 27.10.2016.

http://www.begroup.com/upload/fi/tuotepdf/terakset/putkipalkit_ja_teraspuutket_0314.pdf

CarlStahl. 2014. Nostimet/Vintturit. Luettu 30.11.2016.

<http://www.carlstahl.fi/9020-sahkoketjutalja-cs-kompakti-gm.html>

Danfoss Drives A/S. 2000. Tietämisen arvoista asiaa taajuudenmuuttajista. Kolmas laitos, 1. painos.

Ksteel. 2014. Teräsluettelo. Luettu 27.10.2016.

http://ksteel.fi/wordpress/wp-content/uploads/2014/02/KSteel_tuoteluettelo_2014.pdf

Loadmate. 2011. Electric Chain Hoist Or Electric Wire Rope Hoist? How To Decide?.

Luettu 05.10.2016.

http://www.loadmate.in/article_details.php?id=4

Työsuojeluhallinto. 2008. Koneturvallisuus. Luettu 9.12.2016.

http://tyosuojelujulkaisut.wshop.fi/documents/2008/12/tso_16-2009.pdf

Misumi Mech Lab. Understanding gear profile and gear module. Luettu 10.11.2016.

<http://blog.misumiusa.com/understanding-gear-profile-and-gear-module/>

North American Industries. 2002-2008. Hoists. Luettu 05.10.2016.

<http://www.naicranes.com/dev/cranes/hoists.htm>

Norosoja, P. Yrittäjä. Haastattelu 12.09.2016. Haastattelija Norosoja, L.

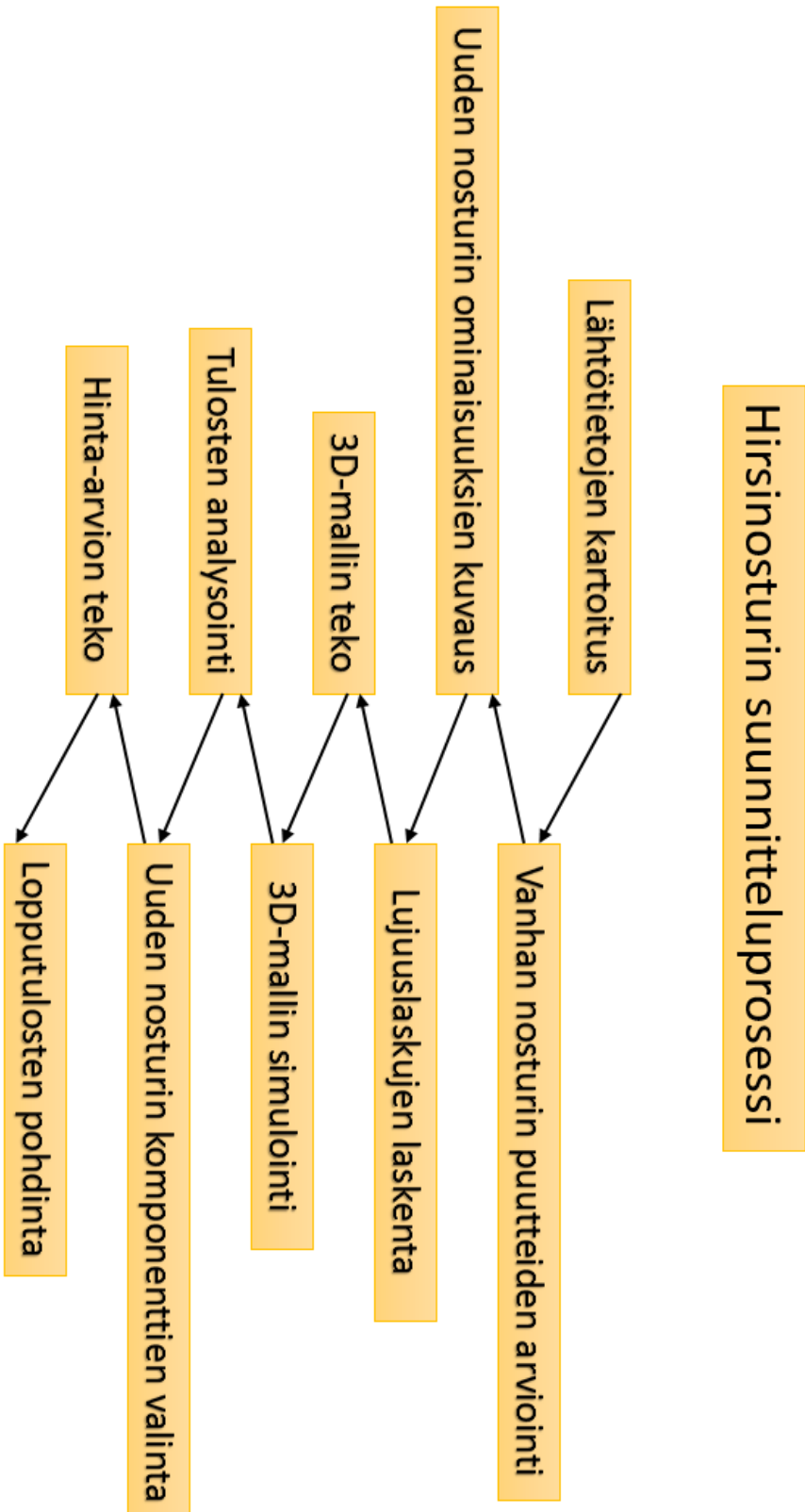
TaideTalli. 2016. Hirsikuvia. Luettu 24.09.2016.

<http://www.taidetalli.fi/hirsi.htm>

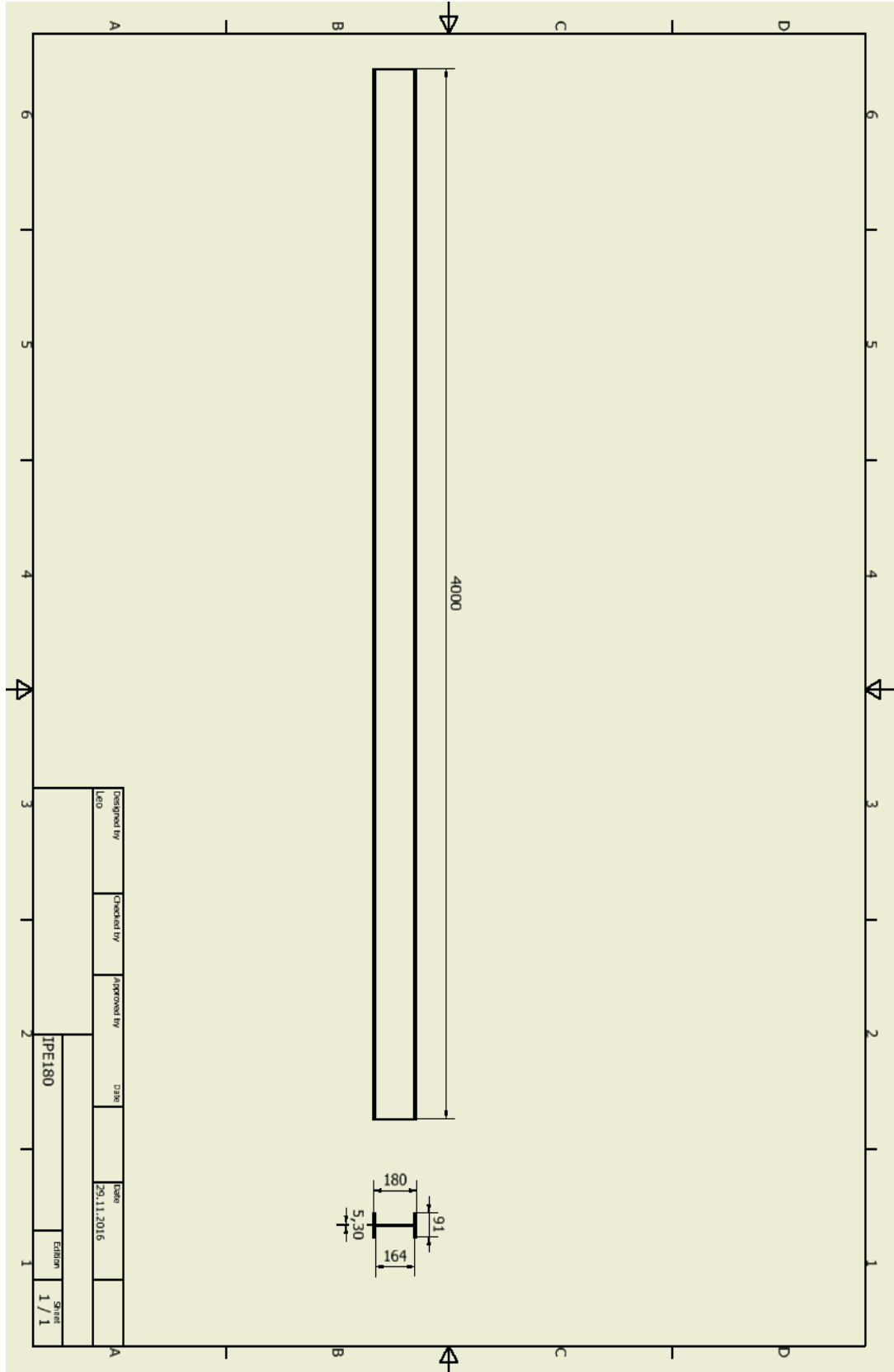
Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2012. Tekniikan kaavasto. 10. painos. Hämeenlinna: Kariston Kirjapaino Oy.

LIITTEET

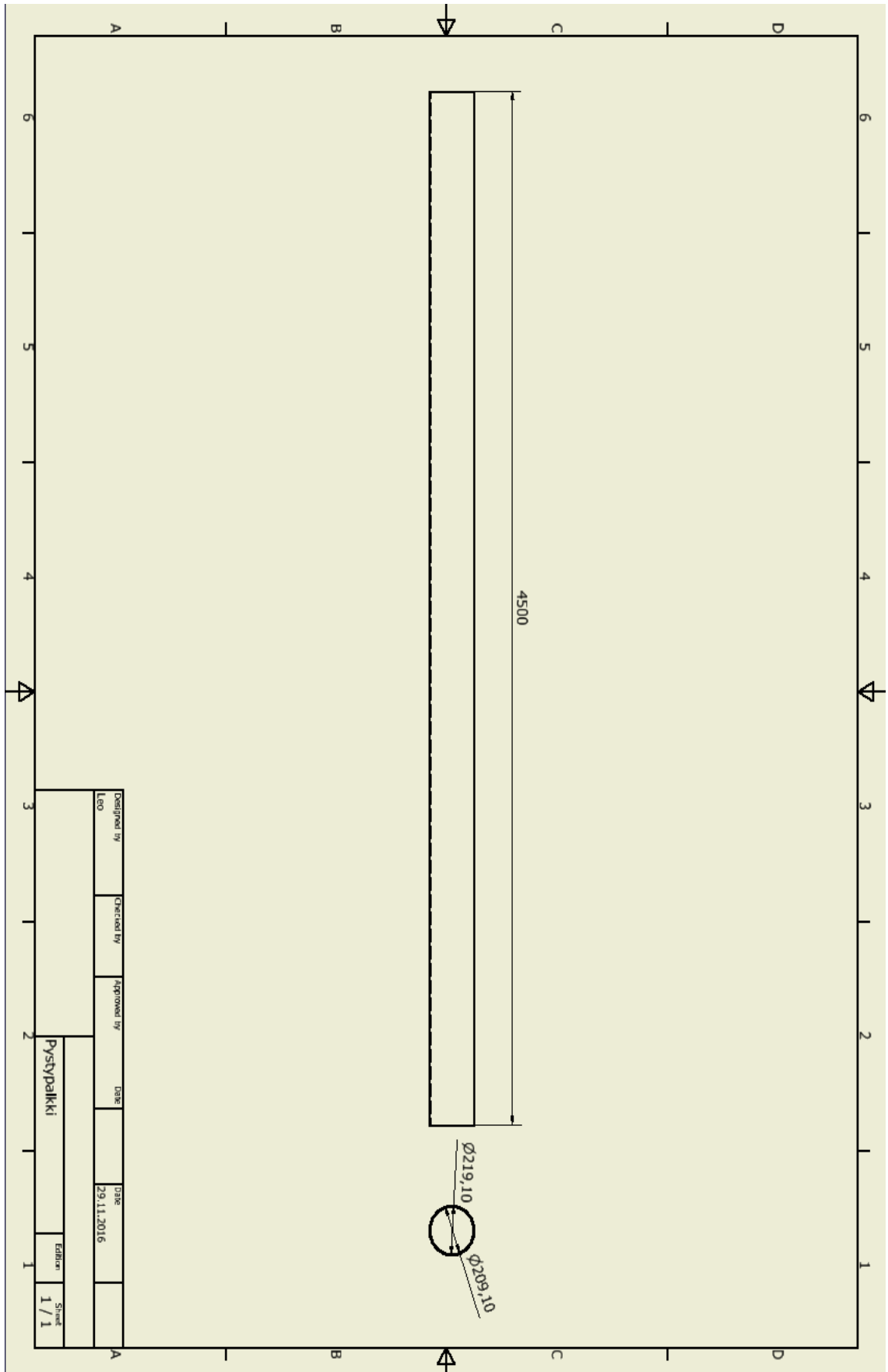
Liite 1. Suunnitteluprosessin kulku



Liite 2. IPE-palkki



Liite 3. Pystypalkki



Liite 4. Hammaspyöräpari

